

引用格式：王骥, 黄良育, 陈江, 等. 磁选态铯原子频率标准技术研制进展[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 15-25.

磁选态铯原子频率标准技术研制进展

王骥^{1,2}, 黄良育^{1,2}, 陈江^{1,2}, 马沛¹, 刘志栋¹, 郭磊^{1,2},

成大鹏¹, 马寅光¹, 董鹏玲¹, 崔敬忠^{1,2}, 张照瑞¹

(1. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;

2. 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 磁选态铯原子频率标准作为精密的守时与时间频率计量仪器设备已经实现了国产化和批量应用。介绍了国产磁选态铯原子频率标准的关键技术, 包括准直器、单束磁选态束光学、电子倍增器、低噪声微波源和数字伺服控制。进一步, 针对不同应用场景, 开发了守时型、轻量化、星载铯原子频率标准产品, 实现了磁选态铯原子频率标准的自主可控。

关键词: 铯原子频率标准; 磁选态; 守时型原子钟

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2022-01-0015-11

Progress on cesium atomic frequency standard with magnetic state-selection technology

WANG Ji^{1,2}, HUANG Liang-yu^{1,2}, CHEN Jiang^{1,2}, MA Pei¹, LIU Zhi-dong¹, GUO Lei^{1,2},
CHENG Da-peng¹, MA Yin-guang¹, DONG Peng-ling¹, CUI Jing-zhong^{1,2}, ZHANG Zhao-rui¹

(1. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The cesium atomic frequency standard with magnetic state-selection has realized localization and extensive application as precise timekeeping and frequency measurement instrument. The key technologies of domestic cesium frequency standard are presented including collimator, single beam magnetic state-selection beam optics, electron multiplier, low noise microwave source and digital servo control. Moreover, three types of cesium frequency standards are developed for timekeeping, lightweight and spaceborne application scenarios to realize independent control of cesium atomic frequency standard with magnetic state-selection.

Key words: cesium atomic frequency standard; magnetic state-selection; timekeeping atomic clock

0 引言

铯原子频率标准, 又称为铯原子频标或铯原子钟, 具有频率准确度高、频率漂移率低以及长期频率稳定度好的优势, 大量用于地面守时、授时和 GPS、GLONASS 等卫星导航系统^[1-3]。铯原子频率标准在

国际计量局 (BIPM) 的所有守时频率标准内占有近 70% 的比例, 我国守时和时间频率计量也大量使用高性能铯原子频率标准, 包括中国科学院国家授时中心、中国计量科学研究院、北京无线电计量测试研究所等单位, 共有数百台铯原子频率标准在用^[4-6]。随着军队信息化和现代化建设的逐步展开, 战场时空统一、武器系统精确控制、作战行动密切协同等场景对于时间频率及其同步的要求越来越高, 守时用途的国产铯原子频率标准需求量也在稳步增加^[7-8]。

1 磁选态铯原子频率标准关键技术

磁选态铯原子频率标准采用传统的二极型非均匀磁场方法制备和检测原子, 技术成熟, 其关键特征包括: 产生热原子束的铯炉及其准直器、二极型选态磁场及其束光学、分离振荡场微波腔、热丝离化及电子倍增器放大。铯原子频率标准主要由磁选态铯束管和频标电路两部分构成, 下面分别对这两部分进行讨论。

1.1 磁选态铯束管

磁选态铯束管属于复杂的电真空器件, 主要由铯炉及其准直器、选态磁铁、微波腔、检测器和电子倍增器等组成^[9]。其中, 铯炉及其准直器、选态磁铁及束光学、电子倍增器决定了铯束管输出信号的信噪比和线宽等主要指标。

1.1.1 铯炉及其准直器

铯炉提供经过准直的铯原子束流, 基本实现方法是加热超高纯度的金属铯, 在 100 左右形成铯蒸汽流, 通过微型多通道准直器后形成小发散角的铯原子束。

铯原子钟对碱金属铯 (Cs) 的纯度要求高, 一般要达到 99.95% 以上, 为了降低噪声还要把钾和铷的含量控制在 0.03% 以下^[10]。铯提纯通常采用多级真空蒸馏的方法, 一般三级蒸馏后就可以将大部分氧化物和其他金属去除掉^[11]。进一步提纯铯需要采用分子蒸馏方法, 降低同族元素带来的噪声, 使铯纯度从 99.5% 达到 99.95%^[10]。

磁选态铯原子频率标准分为标准型和高性能型, 其中铯炉工作温度不同是一个重要特征。表 1 是具体铯原子钟的炉温配置。两种炉温下的饱和蒸气压相差约一个量级, 使铯原子钟稳定度相差约 3 倍^[12], 但是寿命明显缩短^[13]。

表 1 标准型和高性能型铯原子频率标准铯炉温度对比

铯原子钟类型		热敏电阻值/	对应温度/	铯饱和蒸气压/Pa
标准型	铯钟 1	709	98	0.066
	铯钟 2	857	92	0.045
高性能型	铯钟 3	297	130	0.434
	铯钟 4	325	126	0.349

微型多通道准直器是影响铯原子钟束流强度的关键器件。该准直器采用“平片+波纹片”的多层重叠结构, 铯原子以分子流形式在其中运动, 喷出的铯原子束截面接近于矩形, 面积约为 2 mm², 如图 1 所示。由于要在 2 mm² 矩形面积上制作 500 个以上、等效孔径约 50 μm、孔深与直径比超过 60 的微孔阵列, 微型多通道准直器工艺难度大。为使微型多通道准直器能通过较多的平行束铯原子, 相同截面条件下微孔壁厚要尽可能薄, 针对该要求提出了通透率或开口比指标, 即通孔面积与矩形截面面积之比。国内早期铯束管研制采用了蜂窝状结构, 近年来随着微通道板制作技术快速发展也采用过玻璃微通道板, 主要问题是壁厚受工艺限制, 通透率或开口比在 60% 左右。文献[14]中提出了使用多齿滚压成形工艺实

现波纹片批量加工的方法，使用了厚度为 0.1 mm 的不锈钢膜，因尺寸大不能直接用于铯原子钟。作者团队采用了 0.01 mm 厚度的金属薄膜，解决了金属薄膜波纹片成形问题，制作出了符合要求的“平片+波纹片”准直器。

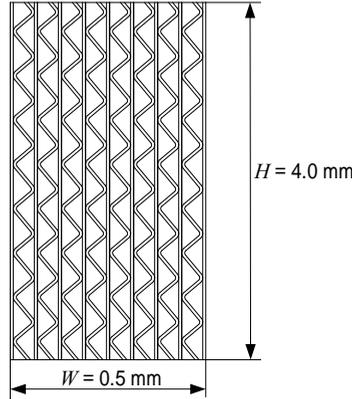


图 1 铯束管用微型多通道准直器结构

1.1.2 单束磁选态束光学优化

单束磁选态铯束管采用二线场选态，这也是目前小型磁选态铯原子钟的主流方案。从准直器发出的铯原子束进入到选态磁铁狭缝中，理想情况下全部集中在磁场梯度均匀区，形成有效铯原子束流，如图 2 所示。

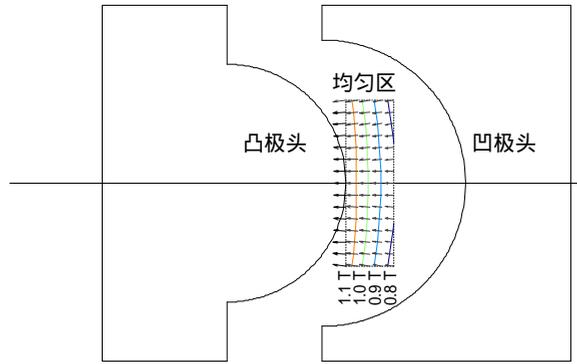


图 2 二极型选态磁铁

二极型选态磁铁主要由凸极头和凹极头组成，铯原子进入选态磁铁缝隙中，在非均匀磁场中受到的力与铯原子有效磁矩和磁场梯度有关，其中 $|F=3, m_F=-3 \sim 3\rangle$ 态和 $|F=4, m_F=-4\rangle$ 态的铯原子受到磁场力方向相同，受力后向磁铁的凸极头偏转， $|F=4, m_F \neq -4\rangle$ 态的铯原子受力后向磁铁凹极头偏转，实现了对两种基态铯原子的磁场分离。铯原子在选态磁铁中的运动轨迹精确计算需要采用数值方法^[15-17]。

磁选态铯原子钟使用了两个完全相同的选态磁铁部件，如图 3 所示。前者（A 磁铁）用于实现原子态制备，选择 $|F=3, m_F=-3 \sim 3\rangle$ 态和 $|F=4, m_F=-4\rangle$ 态的铯原子用于跃迁，经过微波腔后一部分 $|F=3, m_F=0\rangle$ 态铯原子跃迁到 $|F=4, m_F=0\rangle$ 态，后者（B 磁铁）实现检测功能，即包含 $|F=3, m_F=-3 \sim 3\rangle$ 、 $|F=4, m_F=-4\rangle$ 和 $|F=4, m_F=0\rangle$ 态的铯原子束经过 B 选态磁铁后选出 $|F=4, m_F=0\rangle$ 态原子用于检测。实现速率分布、束光学效率精确计算的铯原子运动三维模拟需要采用蒙特卡罗方法^[18-19]。大量的模拟计算发现，磁选态束光学对铯原子的利用率很低，铯束管选速范围很窄，可直接利用选定的铯原子速度进行简化计算，快速获得束光学参数。二维平面上的单束磁选态铯原子钟

束光学设计结果如图 3 所示。

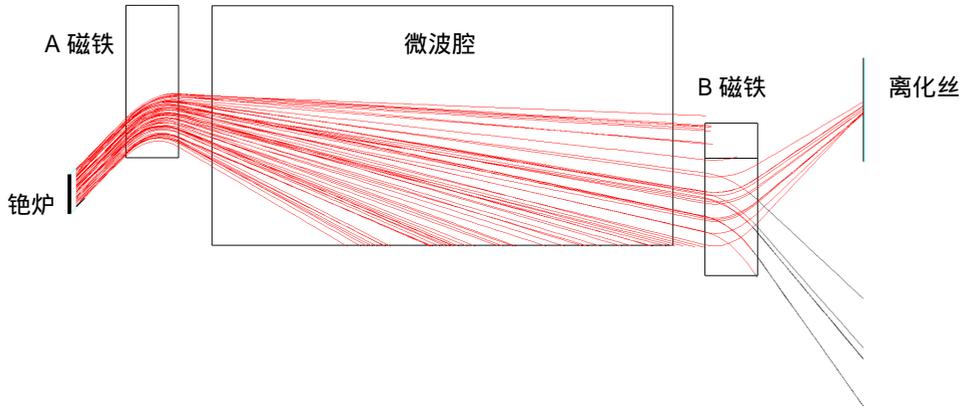
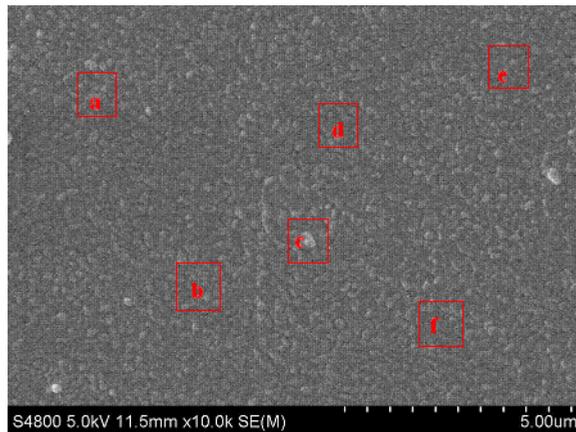


图 3 单束磁选态铯原子钟束光学轨迹设计模拟结果

铯原子束在选态磁铁内的偏转是束光学模拟和工程实际需要解决的主要问题。精心设计的束光学参数以及据此制作的铯束管是高性能型磁选态铯原子钟的保证。

1.1.3 长寿命电子倍增器技术

铯束管产生的鉴频用铯离子信号强度仅为 1 pA 左右，需要放大到 10 nA 以上才能被电路正常处理，该功能由电子倍增器实现。电子倍增器中的二次电子发射材料是氧化镁，二次电子发射系数为 $2.4 \sim 4$ ，采用银镁合金激活产生的合金型发射体不耐大电流轰击是其致命弱点^[20]。长寿命二次电子发射需要制备膜层致密、膜厚均匀且厚度可控的氧化镁薄膜。基于成熟的磁控溅射镀膜方法，国内制备出致密性高的氧化镁膜^[21]。该氧化镁薄膜的形貌结果如图 4 所示，膜厚不均匀性优于 5% 。



a — 125 nm ; b — 120 nm ; c — 125 nm ; d — 125 nm ; e — 124 nm ; f — 125 nm

图 4 扫描电子显微镜 1 万倍氧化镁形貌图

一般认为，二次电子发射材料的性能主要由氧化镁薄膜决定。氧化镁材料虽然具有很好的二次电子发射特性，但其导电性较差，在电子轰击下镁的蒸发速度与轰击电流密度成二次方关系^[20]，因此需要严格控制氧化镁薄膜厚度。针对镁离子在氧化镁薄膜中的运动轨迹问题，结合打拿极材料特性，在 Dekker 模型的基础上建立新的二次电子发射模型^[22]，采用 Monte-Carlo 法模拟出了铯离子在氧化镁中的运动轨迹，如图 5 所示。铯离子垂直入射时散射轨迹沿中心基本对称，二次电子轨迹在距离入射点越近的地方越密集，随着入射离子路程的增加，能够与氧化镁发生作用的离子数量减少。

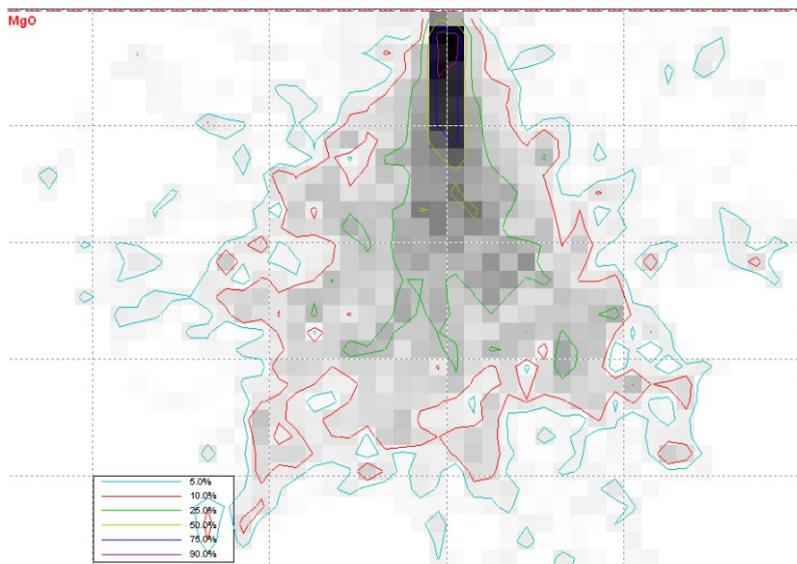


图 5 铯离子在氧化镁中运动轨迹的蒙特卡罗模拟图

进一步分析表明，铯离子入射厚度在 60~70 nm 时，二次电子发射系数最大，过薄或者过厚都会使二次电子发射系数降低。薄膜太薄时，入射电子透过薄膜入射到不锈钢基底上导致二次电子发射系数降低；薄膜太厚时，二次电子发射后氧化镁薄膜层中的电子大量损失，膜层导电性下降，会使得氧化镁膜层损失电子得不到及时补充，从而在膜层表面积累正电荷形成电场而阻止二次电子的有效逸出。

利用这种经过厚度优化的均匀、致密的氧化镁薄膜制作了盒栅型电子倍增器，采用光电激发产生入射原电子的方法进行测试检验^[23]，增益衰减符合铯束管长寿命要求。图 6 为该类型电子倍增器工作电压随时间变化情况，连续测试接近 3 年，工作电压从起始的 1 158 V 开始缓慢上升，连续工作 2 年后电压增幅平均小于 0.1 V/d，电子倍增器寿命预计可以超过 10 年。

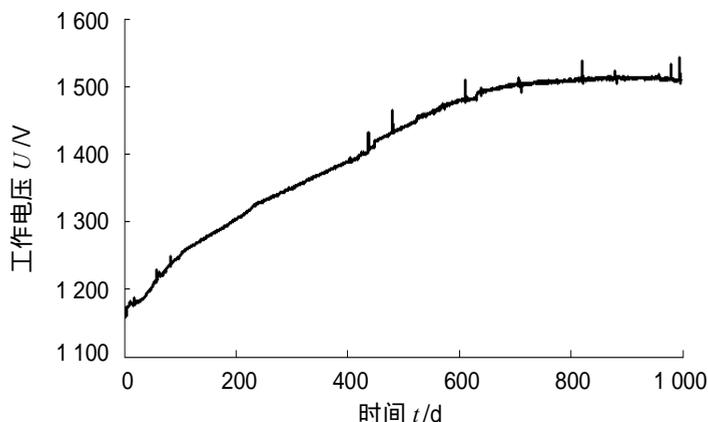


图 6 铯原子频标整机内电子倍增器工作电压变化曲线

1.2 频标电路

频标电路包括压控晶振、微波频率源、小信号放大、电源电路和数字伺服控制电路等，利用铯束管提供的鉴频信号对压控晶振频率进行控制，输出标准频率和时间信号。目前，铯原子频率标准采用数字化技术自动采集和实时控制各种物理参量，使铯原子频率标准整机能保持长期连续稳定工作^[21]。下面主要介绍与性能相关的微波频率源和数字伺服控制技术。

1.2.1 低噪声微波频率源

低噪声微波频率源主要由微波倍频锁相环路和中频直接频率合成模块 (DDS) 构成, 原理框图如图 7 所示。该微波频率源方案借鉴了文献[24]提出的新结构, 进一步提高了集成度, 由 10 MHz 直接产生 9 192.6 MHz 的铯束管所需微波信号, 采用 9 192.6 MHz 压控晶振 (VCO) 提高了微波输出信号的可靠性, 降低了调试难度, 利用锁相环改善了相位噪声指标。9 192.6 MHz 微波源的相位噪声经过幅度调制后施加在铯束管上, 会影响铯束管的输出信号信噪比, 改善该微波源的相噪指标可以改善整机的稳定度指标。该微波模块输出的 9 192.6 MHz 微波信号相位噪声达到 -60 dBc/Hz @ 3 Hz、 -65 dBc/Hz @ 10 Hz 和 -79 dBc/Hz @ 100 Hz 水平, 在 30 Hz 的调制频率上相位噪声优于 -70 dBc/Hz, 如图 8 所示。

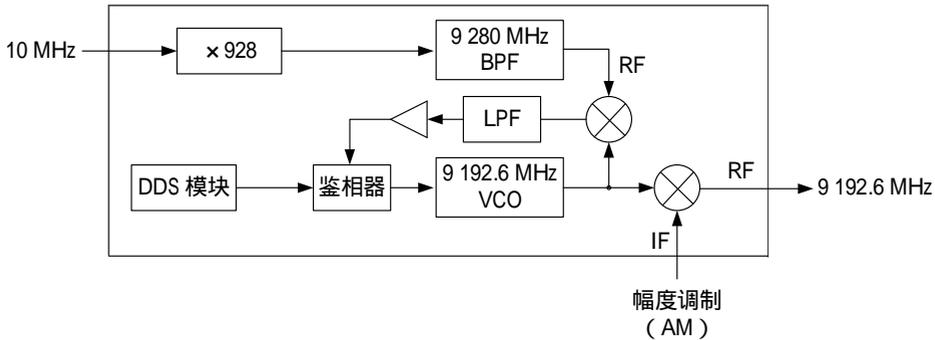


图 7 铯原子频标微波频率源原理框图

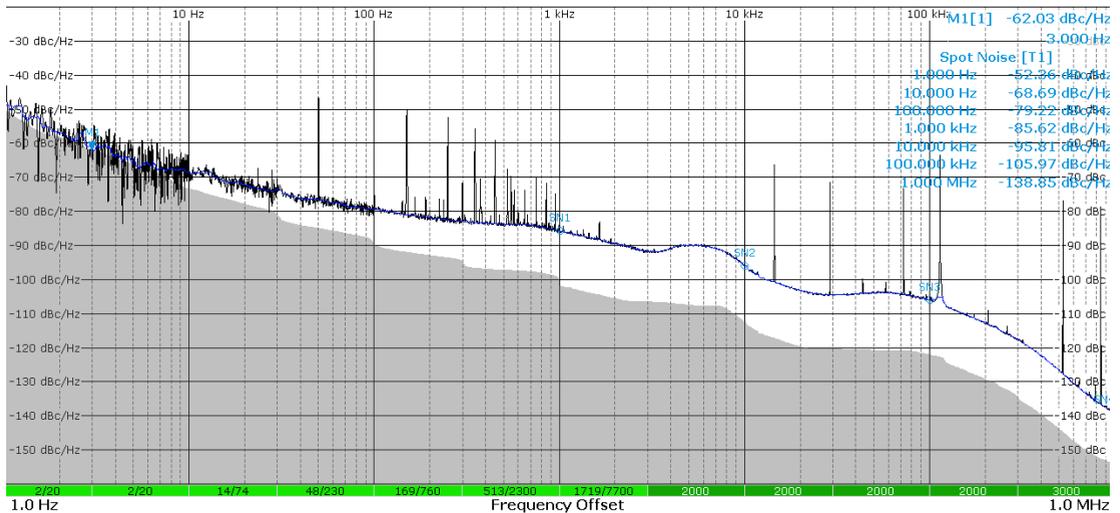


图 8 铯原子频标微波频率源相位噪声

1.2.2 参数数字伺服控制

铯原子频率标准采用数字化电路进行参量采集和控制, 过程完全不需要人工干预。伺服控制的变化量主要包括铯炉温度、C 场电流、微波功率、倍增器电压和压控晶振的压控电压 5 项^[25-26], 其中晶振的压控电压环路最重要, 也称为钟伺服环路。铯炉温度采用热敏电阻数字控温方法, 炉温稳定后实测温度变化优于 ± 0.3 。C 场电流锁定在原子跃迁频率上, 稳定后电流变化达到 $\pm 1 \mu\text{A}$ 。钟伺服环路算法采用多点频率调制产生的误差信号进行计算, 可以扣除临线 Rabi 牵引的影响^[27]。受铯束管内 Rabi 牵引、Ramsey 牵引和腔体牵引等因素的影响, 频率对微波幅度大小变化非常敏感, 因此要对微波幅度进行优化控制, 将微波幅度控制到跃迁几率曲线的最大值附近, 微波幅度偏差须控制在 0.05 dB 以内, 才能有效改善铯原子频率标准的长期稳定度^[28]。倍增器电压根据铯束管输出信号峰值实时调节, 保证信号峰值变化小于 5%。

2 守时型铯原子频率标准

守时授时系统主要使用高性能型铯原子钟，高性能型铯原子钟比标准型铯原子钟关键指标约高半个量级，具体对比见表 2。

表 2 高性能型铯原子钟和标准型铯原子钟关键指标对比

指标	高性能型	标准型
频率准确度	5.0×10^{-13}	1.0×10^{-12}
	$5.0 \times 10^{-12}/1 \text{ s}$	$1.2 \times 10^{-11}/1 \text{ s}$
	$3.5 \times 10^{-12}/10 \text{ s}$	$8.5 \times 10^{-12}/10 \text{ s}$
	$8.5 \times 10^{-13}/100 \text{ s}$	$2.7 \times 10^{-12}/100 \text{ s}$
频率稳定度	$2.7 \times 10^{-13}/1 \text{ 000 s}$	$8.5 \times 10^{-13}/1 \text{ 000 s}$
	$8.5 \times 10^{-14}/10 \text{ 000 s}$	$2.7 \times 10^{-13}/10 \text{ 000 s}$
	$2.7 \times 10^{-14}/100 \text{ 000 s}$	$8.5 \times 10^{-14}/100 \text{ 000 s}$
	$1.0 \times 10^{-14}/5 \text{ d}$	$5.0 \times 10^{-14}/5 \text{ d}$
频率复现性	1.0×10^{-13}	1.0×10^{-13}

在标准型铯原子钟产品基础上，国产高性能磁选态铯原子钟主要开展了以下 3 方面的工作来提高性能：

提出了小发散角高通透准直器技术，采用 0.01 mm 不锈钢箔膜压制波纹片，使通透率达到 75%；采用基于粒子模拟的束光学优化方法，对选态磁铁和离化丝开展了部件及其位置优化，在提高炉温到 130 的情况下使铯束管信噪比达到 4 000 以上；

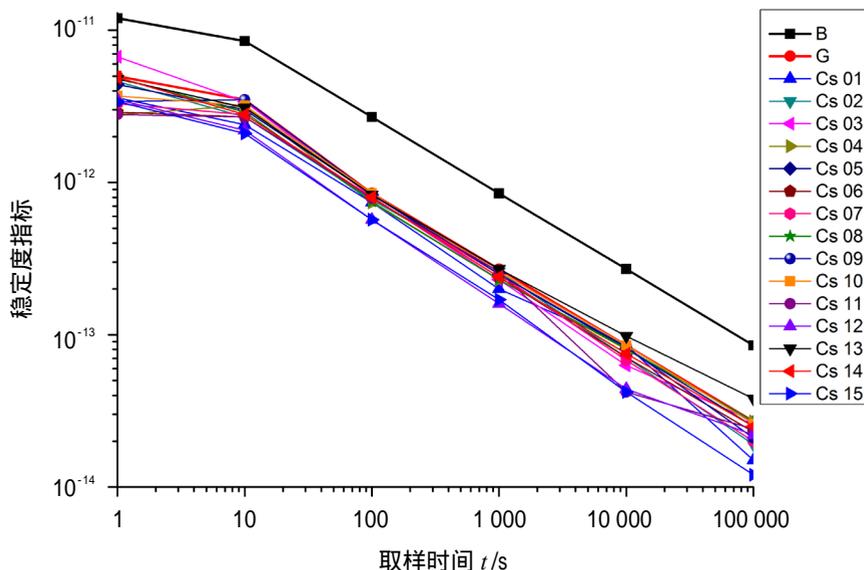
采用积分分离 PID 算法对 C 场电流进行控制，保证反应及时并且在收敛后准确性较好。通过 C 场电流调节， $|F=3, m_F=0\rangle$ 到 $|F=4, m_F=0\rangle$ 的跃迁峰频率值与 $|F=3, m_F=+1\rangle$ 到 $|F=4, m_F=+1\rangle$ 的跃迁峰频率值之间的频率差控制在 $\pm 20 \text{ Hz}$ 之内，提高了产品的频率准确度和复现性等性能指标^[29]；

采用“DDS+滤波器”的电路结构，实现了以 80 MHz 频率信号作为参考信号，输出频率为 87.3 MHz 的中频信号，供锁相环产生激励铯原子跃迁频率的尾数频率^[30]，经过倍频综合得到的 9 192.6 MHz 的微波信号在 100 Hz 处的相位噪声达到 -79 dBc/Hz。

通过以上的技术攻关工作，经计量检定，多台国产磁选态铯原子钟产品的频率准确度、频率稳定度等性能指标达到高性能型铯原子钟水平，部分检定结果如图 9 所示。

3 轻量化铯原子频率标准

小型轻量化也是铯原子钟的发展方向之一，美国推出了采用“Cs-III”技术的第三代铯原子钟产品 Cs4000、Cs4310、TimeCesium 4400 等，目标是在保证更高的稳定度、较低的相位噪声和更长的使用寿命条件下，具备便携、紧凑和经济性特征，满足通信、校准、计量和测试等各种应用需求。例如，Cs4310B 铯原子钟的重量为 13.5 kg，高度只有 2 U^[31]。小型轻量化铯原子钟用于电信领域，可以满足自主、运行质量和安全性需求^[32-33]。



注：图中 B 为标准型指标，G 为高性能型指标

图 9 国产磁选态铯原子钟部分产品第三方检定结果

在 LIP Cs-3000 铯原子钟基础上，针对小型化和轻量化需求，开展了铯束管小型轻量化、频标电路小型化与集成化研究，研制了小型轻量化铯原子钟样机，通过了环境试验和指标检定，产品的功能和性能得到验证。小型轻量化铯原子钟样机重量 20 kg，体积 22 L，外观如图 10 所示。高性能型小型轻量化铯原子钟关键性能指标如表 3 所示。



图 10 小型轻量铯原子钟照片

表 3 小型轻量铯原子钟关键指标

指标	要求	高性能型样机
频率准确度	5.0×10^{-13}	2.7×10^{-13}
	$5.0 \times 10^{-12}/1 \text{ s}$	$3.6 \times 10^{-12}/1 \text{ s}$
	$3.5 \times 10^{-12}/10 \text{ s}$	$2.2 \times 10^{-12}/10 \text{ s}$
	$8.5 \times 10^{-13}/100 \text{ s}$	$5.9 \times 10^{-12}/100 \text{ s}$
频率稳定度	$2.7 \times 10^{-13}/1 \text{ 000 s}$	$2.1 \times 10^{-13}/1 \text{ 000 s}$
	$8.5 \times 10^{-14}/10 \text{ 000 s}$	$5.4 \times 10^{-14}/10 \text{ 000 s}$
	$2.7 \times 10^{-14}/100 \text{ 000 s}$	$2.3 \times 10^{-14}/100 \text{ 000 s}$
	$2.0 \times 10^{-14}/5 \text{ d}$	$1.9 \times 10^{-14}/5 \text{ d}$
频率复现性	2.0×10^{-13}	6.6×10^{-14}

4 星载铯原子钟

全球卫星导航系统推动了星载原子钟技术的快速发展，磁选态铯原子钟具有频率漂移率低、长期频率稳定度好的优势，大量用于导航系统卫星^[34-35]。需要解决铯原子钟因发射、入轨过程中受到强烈冲击和振动、在轨环境温度大范围变化、微重力环境、真空环境等带来的复杂空间环境适应性^[36-37]。

北斗卫星导航系统使用的星载铯原子钟指标对标了 GPS Block IIF 上使用的 4410 星载铯原子钟，在现有地面磁选态铯原子钟方案基础上，开展了整机轻量化设计和部组件加固，采用数字化技术改善铯原子钟频率准确度和频率稳定度指标^[38]。铯束管采用了多孔金属材料防止金属铯在微重力条件下溢出，束光学通过蒙特卡洛粒子模拟优化，信噪比超过 3 000。9 192.6 MHz 低噪声微波链路采用 DDS 和锁相环技术产生低噪声的微波激励信号，设计了以 DSP 为核心的数字伺服系统对微波功率、C 场强度、倍增器电压和 10 MHz OCXO 晶振输出频率进行伺服控制。正样件通过了随机振动、热循环和热真空环境试验^[39]。

星载铯原子钟外观如图 11 所示，关键技术指标如表 4 所示。在轨性能测试使用星上被动型氢原子钟作为参考源，通过卫星遥测通道将铯钟与氢钟的相位差数据下传，利用相位差数据计算获得频率准确度和频率稳定度结果^[40]。根据在轨测试的分析结果，国产星载铯钟的频率稳定度、频率准确度、频率漂移率三个核心指标均达到了俄罗斯 GLONASS 卫星星载铯原子钟和美国 GPS 系统 BLOCK IIF 卫星星载铯原子钟的技术指标。

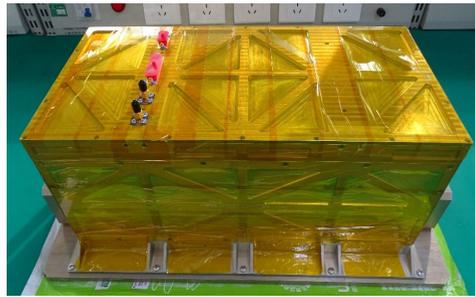


图 11 星载铯原子钟照片

表 4 星载铯原子钟的关键指标^[40]

指标	在轨评估结果	地面测试结果
频率准确度	1.73×10^{-12}	1.29×10^{-12}
	$1.91 \times 10^{-12}/1 \text{ s}$	$1.19 \times 10^{-12}/1 \text{ s}$
	$2.48 \times 10^{-12}/10 \text{ s}$	$2.60 \times 10^{-12}/10 \text{ s}$
频率稳定度	$1.00 \times 10^{-12}/100 \text{ s}$	$1.09 \times 10^{-12}/100 \text{ s}$
	$2.98 \times 10^{-13}/1 \text{ 000 s}$	$3.06 \times 10^{-13}/1 \text{ 000 s}$
	$1.17 \times 10^{-13}/10 \text{ 000 s}$	$9.45 \times 10^{-14}/10 \text{ 000 s}$
	$4.95 \times 10^{-14}/100 \text{ 000 s}$	$3.62 \times 10^{-14}/100 \text{ 000 s}$
频率漂移率	$1.12 \times 10^{-16}/\text{d}$	$5.73 \times 10^{-16}/\text{d}$

5 结语

铯原子频率标准是守时授时、频率计量的核心设备，对建设独立自主时间频率系统具有重要意义。

由于技术复杂,工艺难度大,国产铯原子频率标准长期以来一直未能实现批量制造和商品化。通过对铯束管中铯炉及其准直器、选态磁铁及束光学、电子倍增器技术等的研究,解决了铯原子频率标准的中短期性能指标和寿命关键问题,低噪声微波频率源和数字伺服控制技术的突破使铯原子频率标准的长期稳定度达到国外同类产品水平。进一步,针对国内在守时、通信、导航等领域的应用需求,分别开发了守时型铯原子频标、轻量化铯原子频标和星载铯原子钟产品,实现了磁选态铯原子钟产品的自主可控,为我国建设独立自主时频体系奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王义道,王庆吉,傅济时,等.量子频标原理[M].北京:科学出版社,1986:271-365.
- [2] 杨军,毛新凯,卢心竹.国内外频率标准发展现状[J].宇航计测技术,2020,40(5):1-10.
- [3] 张首刚.新型原子钟发展现状[J].时间频率学报,2009,32(2):81-91.
- [4] BIPM. BIPM Annual Report on Time Activities[EB/OL]. (2021-03-25)[2021-10-16] <https://www.bipm.org/en/time-ftp/annual-reports>.
- [5] 王正明.高精度守时对原子钟性能的要求[J].天文学进展,2008,26(3):288-295.
- [6] 张爱敏,杨志强,张越,等.铯原子频率标准比对方法研究[J].计量学报,2014,35(3):286-290.
- [7] 王义道.建设我国独立自主时间频率系统的思考[J].宇航计测技术,2004,24(1):1-10.
- [8] 王勇征,马红芳,孙向芳,等.国内外小型铯原子钟的发展[J].数码设计(上),2020,9(3):281.
- [9] 翟造成,张为群,蔡勇,等.原子钟基本原理与时频测量技术[M].上海:上海科学技术文献出版社,2009:40-44.
- [10] 马寅光,王骥,陈江,等.基于分子蒸馏原理的高纯铯制备研究[J].真空科学与技术学报,2015,35(12):1466-1469.
- [11] 马寅光,张涤新,刘苏明.金属铯真空蒸馏提纯装置的研制[J].真空与低温,2008,14(2):99-102.
- [12] 王克廷,陈海军,卢斌,等.商品型铯束频标及其寿命[C]//2003年全国时间频率学术交流会,贵阳:全国时间频率学术组委员会,2003:322-329.
- [13] 成大鹏,马寅光,王骥,等.影响铯束管寿命因素的分析[J].真空与低温,2015,21(1):48-50.
- [14] 潘敏强,曾德怀,汤勇,等.催化剂波纹载体薄片的多齿滚压成形[J].华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(8):11-15.
- [15] RADECKI K W, WASIAK D, MORYC A. 3D computer modeling of conventional cesium beam tube[C]//18th European Frequency and Time Forum (EFTF 2004), IEEE, 2004.
- [16] JADUSZLIWER B. A cesium beam atomic clock computer model[C]//1996 IEEE international frequency control symposium (IFCS 1996), Honolulu: IEEE, 1996: 1097-1105.
- [17] 朱宏伟,陈江,张涤新,等.双极型磁选态单束铯束管内铯原子运动轨迹的算法改进[J].宇航学报,2010,31(9):2189-2194.
- [18] 朱宏伟,陈江,张涤新,等.磁选态单束铯束管铯原子速率分布的模拟计算[J].宇航计测技术,2010,30(3):25-28+32.
- [19] 朱宏伟,张涤新,陈江,等.磁选态单束铯束管束光学参数的模拟计算和设计[J].宇航计测技术,2011,31(5):44-49.
- [20] 林祖伦,王小菊.阴极电子学[M].北京:国防工业出版社,2013:224,241.
- [21] 陈江,马沛,王骥,等.小型磁选态铯原子钟产品化进展[J].宇航计测技术,2020,40(3):12-16+45.
- [22] 何一蕾,王多书,郭磊,等.打拿极材料二次电子发射系数计算模型研究现状[J].真空与低温,2017,23(4):207-211.
- [23] 杜威志,王多书,李晨,等.二次电子发射系数的光电测试方法研究[J].真空与低温,2014,20(6):332-334+343.
- [24] RICHARD K K. A new RF architecture for cesium frequency standards[C]//1992 IEEE international frequency control symposium (IFCS 1992), IEEE, 1992: 134-142.
- [25] 刘春侠,王改霞,漆溢. HP5071A 铯原子钟内部工作参数的监视与分析[J].时间频率学报,2004,27(1):54-63.
- [26] 王晓露,黄凯,高连山.铯原子频标伺服优化技术的研究[J].导航定位与授时,2017,4(2):58-63.

- [27] LEONARD S C, ROBIN P G. Architecture and algorithms for new cesium beam frequency standard electronics[C]//1992 IEEE international frequency control symposium (IFCS 1992), IEEE, 1992: 127-133.
- [28] 马沛, 陈江, 董鹏玲, 等. 铯原子钟优化算法中微波幅度控制方法的研究[J]. 真空与低温, 2018, 24(6): 415-418.
- [29] 陈是, 王骥, 黄良育, 等. 基于 PID 算法的磁选态铯束管 C 场的优化[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(2): 54-61.
- [30] 董鹏玲, 蔺璟, 马沛, 等. 星载铯原子钟用高精度频率合成器设计[J]. 真空与低温(网络版), 2021, 27(5): 508-511.
- [31] Microsemi. Microsemi_CsIII_4310B_Datasheet_900-00509-000B [EB/OL]. (2021-09-22)[2021-10-16] <https://www.microsemi.com/product-directory/cesium-frequency-references/4114-csiii-model-4310b#resources>.
- [32] 于佳亮. 通信同步网铯原子钟应用探讨[J]. 电信技术, 2017(1): 79-81.
- [33] 于佳亮. 关于通信同步网体系架构的探讨[J]. 时间频率学报, 2017, 40(3): 193-198.
- [34] 吴海涛, 李孝辉, 卢晓春, 等. 卫星导航系统时间基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 10-13.
- [35] 陈江, 李得天, 王骥, 等. 导航铯原子钟的发展现状及趋势[J]. 国际太空, 2016(4): 20-24.
- [36] 王义道. 原子钟与时间频率系统(文集)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 134-144.
- [37] 杨军, 陈江, 郑宁, 等. 星载铯原子钟的环境适应性研究[C]//第十届中国卫星导航学术年会, 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019.
- [38] 王骥, 陈江, 刘志栋, 等. 星载铯原子钟结构设计[C]//第十二届中国卫星导航学术年会, 南昌: 中国卫星导航系统管理办公室, 2021.
- [39] YANG Jun, ZHENG Ning, CUI Jing-zhong, et al. Ground environment test and in-orbit performance verification of spaceborne cesium atomic clock[C]//China satellite navigation conference (CSNC 2021) proceeding, 2021: 172-179.
- [40] MA Pei, XIE Jun, CUI Jing-zhong, et al. Analysis of in-orbit data of domestic spaceborne cesium atomic clock[C]//China satellite navigation conference (CSNC 2021) proceeding, 2021: 180-189.